نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۹، ص. ۲۳۹-۲۲۵

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 1, March-April 2020, p. 225-239

اثر تغییرات اقلیمی بر رواناب و تبخیر و تعرق حوزه آبخیز مهرگرد

زهرا نوری[۱]- علی طالبی[۲]*- بابک ابراهیمی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۲

چکیده

تغییر اقلیم اثرات قابل توجهی بر چرخه آبی دارد، به گونه‌ای که می‌تواند تهدیدی بزرگ برای سامانه‌های آبی در جهان قلمداد شود. هدف از این مطالعه بررسی اثر احتمالی تغییر متغیرهای اقلیمی بر رواناب و تبخیر و تعرق حوزه آبخیز مهرگرد است. برای این منظور با استفاده از مدل SDSM5.2 و سناریوی RCP8.5 خروجی مدل تغییر اقلیم CanESM2 ریزمقیاس‌نمایی و برای دوره ۲۰۱۷ تا ۲۰۳۰ شبیه‌سازی شد. از داده‌های روزانه حداقل و حداکثر دما در ایستگاه بروجن و بارش ایستگاه تنگ زردآلو برای دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۴ به عنوان ورودی‌های مدل اقلیمی استفاده شد. همچنین برای شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی حوزه آبخیز از مدل SWAT2012 استفاده شد. عملیات واسنجی برای دوره ۲۰۱۲-۲۰۰۴ و اعتبارسنجی برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۱۳ با استفاده از الگوریتم SUFI-2 انجام شد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل SDSM5.2 براساس معیارهای آماری NS، R^2 و RMSE نشان داد که مدل در شبیه‌سازی متغیر دما نسبت به بارش از دقت بالاتری برخوردار بوده است. بر این اساس برای آینده کاهش ۵۳/۴۸ درصدی بارش و افزایش ۰/۸۴ و ۳/۹۹ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب برای حداقل و حداکثر دما پیش‌بینی شد. ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین برای رواناب در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۷۳ و برای مرحله اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۷۱ به دست آمدند. همچنین تغییراقلیم باعث کاهش ۲۳/۸۲ درصدی رواناب، کاهش ۲۶/۰۳ درصدی تبخیر و تعرق واقعی و افزایش ۱۰/۲۰ درصدی تبخیر و تعرق پتانسیل خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب، تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، سناریوهای اقلیمی، مدل SWAT

مقدمه

اقلیم کره زمین از زمان پیدایش جو بر روی این سیاره تغییر کرده، اما سرعت آن هیچ‌گاه به اندازه عصر حاضر نبوده است. از نظر پژوهش‌گران، این مقدار شدت در تغییرات اقلیمی به‌دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر است که غالبا منشأ انسانی دارند (۱۶). بر اساس گزارش ارزیابی پنجم (AR5) هیئت بین‌الدول تغییر آب و هوا (IPCC[4])، دمای جهانی طی سال‌های ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ به میزان ۰/۸۵درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است و در آینده تا سال ۲۱۰۰ به میزان ۰/۳ تا ۴/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (۱۷). تغییرات آب و هوایی از طریق تغییر در زمان، مقدار، شکل بارش، نرخ تبخیر و انتقال و رطوبت خاک، رواناب بر چرخه هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد (۲۳). استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی همراه با مدل‌های گردش عمومی (GCMS[5]) و یا مدل‌های آب و هوایی منطقه‌ای (RCMS[6]) رایج‌ترین روش برای ارزیابی تأثیرات تغییرات آب و هوایی بر جریان است (۲۵ و ۸) در مطالعات هیدرولوژی باید توجه داشت که معمولا مساحت سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM[7] بزرگ‌تر از وسعت منطقه مطالعاتی است بنابراین برای استفاده از نتایج این مدل‌ها در سطح حوضه، باید خروجی‌های مدل ریزمقیاس نمایی شوند (۱۴). روش‌های مختلفی بدین منظور وجود دارد که روش‌های آماری از روش‌های مرسوم می‌باشد و نرم‌افزارهایی نیز در این رابطه توسعه یافته است که از جمله آن‌ها می‌توان مدل SDSM [8] را نام برد (۱۵). شناخت و درک مفهوم بیلان آب یکی از پیش نیازهای ضروری در راستای مدیریت پایدار منابع آب در سطح حوزه‌های آبخیز است.

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری و استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد
(*- نویسنده مسئول: Email: talebisf@yazd.ac.ir)
۳- دکتری ژئومورفولوژی، مدیر دفتر برنامه‌ریزی و بررسی‌های اقتصادی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان

DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82329

4- Intergovernmental Panel on Climate Change
5- General Circulation Models
6- Regional Climate Models
7- Atmosphere Ocean General Circulation Model
8- Statistical Down Scaling Model

مهمترین عناصر بیلان آب از دیدگاه مدیریت منابع آب شامل بارش، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، جریان زیرزمینی و جریان جانبی می‌باشند. بنابراین، می‌توان اجزاء منابع آب موجود در یک سیستم را در دوره‌های زمانی مختلف، مورد مقایسه قرار داد و درجه تأثیر هر یک را در تغییرات بیلان آبی سیستم‌های هیدرولوژیکی شناسایی کرد (۳۱). امروزه برای مطالعه و برنامه‌ریزی پایدار و مؤثر در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT[1]) نمونه‌ای از مدل‌های هیدرولوژیک با مبنای فیزیکی است که بر اساس ویژگی‌های حوزه آبخیز و شرایط اقلیمی آن به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و هم‌چنین پایش فرایندهای مرتبط با چرخه آب می‌پردازد (۲۹). با توجه به اهمیت بحث اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است. زو و همکاران (۳۸) در مطالعه‌ای پاسخ هیدرولوژیکی به تغییرات آب و هوایی در حوضه رودخانه Wei چین را با استفاده از مدل SWAT و SDSM مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میانگین رواناب سالانه در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶، ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به‌ترتیب ۱۲/۴ درصد و ۴۵ درصد نسبت به دوره پایه ۲۰۰۸-۱۹۶۱ افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران (۳۷) در مطالعه‌ای با استفاده از دو مدل SWAT و SDSM، جریان‌های رودخانه Xin در چین را تحت تأثیر تغییرات اقلیمی ارزیابی کردند. در ادامه از GCMهای مختلف (BCC-CSM1.1، CanESM2 و NorESM1-M) تحت سه سناریو (RCPS) استفاده کردند. بر این اساس درجه‌حرارت به‌طور مداوم در منطقه افزایش می‌یابد، با این حال بارش آینده بسیار پیچیده و نامطمئن است. ملک و آبگاز (۲۲) در مطالعه‌ای اثر تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه رودخانه Gumara را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و SDSM مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده آن است که میانگین جریان سالانه در آینده به میزان ۱۷/۸ درصد افزایش می‌یابد. آبراهام و همکاران (۲) در مطالعه‌ای شرایط رواناب آینده تحت تأثیر تغییر اقلیم را توسط دو مدل اقلیمی CMIP5 در دریاچه Ziway، دره ریفت اتیوپی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حداقل و حداکثر دما تحت سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5 افزایش می‌یابد و در مقابل بارش به شدت کاهش می‌یابد. قرمزچشمه و همکاران (۱۰) در پژوهشی تغییرات جریان تحت تأثیر اقلیم در حوضه رودخانه کن را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM مورد بررسی قرار دادند. در نهایت برای همه ایستگاه‌های مطالعاتی افزایش دمای بیشینه و کمینه به ترتیب حدود ۱/۳ و ۰/۸ درجه سانتی‌گراد و کاهش بارش پیش‌بینی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب، کاهش آن را نسبت به دوره پایه نشان داد. اکبری و همکاران (۴) در پژوهشی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رودخانه ارس را با استفاده از مدل SWAT و سناریوهای گزارش پنجم IPCC مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده کاهش رواناب در سال‌های بررسی شده است. گودرزی و همکاران (۱۳) در مطالعه‌ای عدم قطعیت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی در تخمین جریان آتی حوضه آبریز قره‌سو تحت اثر تغییر اقلیم را بررسی کردند. نتایج حاکی از برتری مدل‌های CanESM2 و Hadcm3 برای هر دو متغیر بارش و دما بود. در نهایت نتایج با هدف بررسی تغییرات رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم به مدل هیدرولوژیکی معرفی شد. به طور کل اکثر مدل‌ها افزایش رواناب در فصل زمستان و کاهش آن در بقیه فصول نسبت به دوره پایه را پیش‌بینی می‌کنند. نظر به این‌که حوزه آبخیز مهرگرد در سال‌های گذشته در وضعیت مطلوبی به لحاظ منابع آبی قرار داشته است اما متأسفانه در چند سال اخیر به‌واسطه تغییر شرایط آب و هوایی، وضعیت هیدرولوژیکی آن دستخوش تغییراتی شده است به‌نحوی که ساکنین حوزه آبخیز مذکور را به لحاظ دسترسی به منابع آب با مشکل رو به رو کرده است. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع تغییر اقلیم و تأثیر آن بر اجزاء مختلف کره زمین به‌خصوص چرخه هیدرولوژیکی، این پژوهش در نظر دارد تا با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و مدل اقلیمی CanESM2 که یکی از مدل‌های تغییر اقلیم جفت شده CMIP5 است تحت سناریو RCP8.5 اثر تغییر متغیرهای اقلیمی را بر رواناب و تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل حوزه آبخیز مهرگرد در آینده مورد بررسی قرار دهد. برای این منظور از مدل آماری SDSM5.2 برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی بزرگ مقیاس پایگاه NCEP[2] استفاده شد. ضمن اینکه مدل SDSM تاکنون بیش‌تر برای ریز مقیاس‌نمایی دما و بارش در مناطق مرطوب به‌کار رفته است و در نواحی خشک و نیمه خشک کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این حوزه آبخیز تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای از حیث بررسی اثر تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آب صورت نگرفته است لذا این پژوهش می‌تواند زمینه‌ای را برای مطالعات گسترده‌تر در راستای مدیریت هرچه بهتر منابع آب در حوزه آبخیز مذکور و حوزه‌های آبخیز با شرایط مشابه فراهم کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز مهرگرد به طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۷ دقیقه و ۳۶ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۱۹ دقیقه و ۸ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی

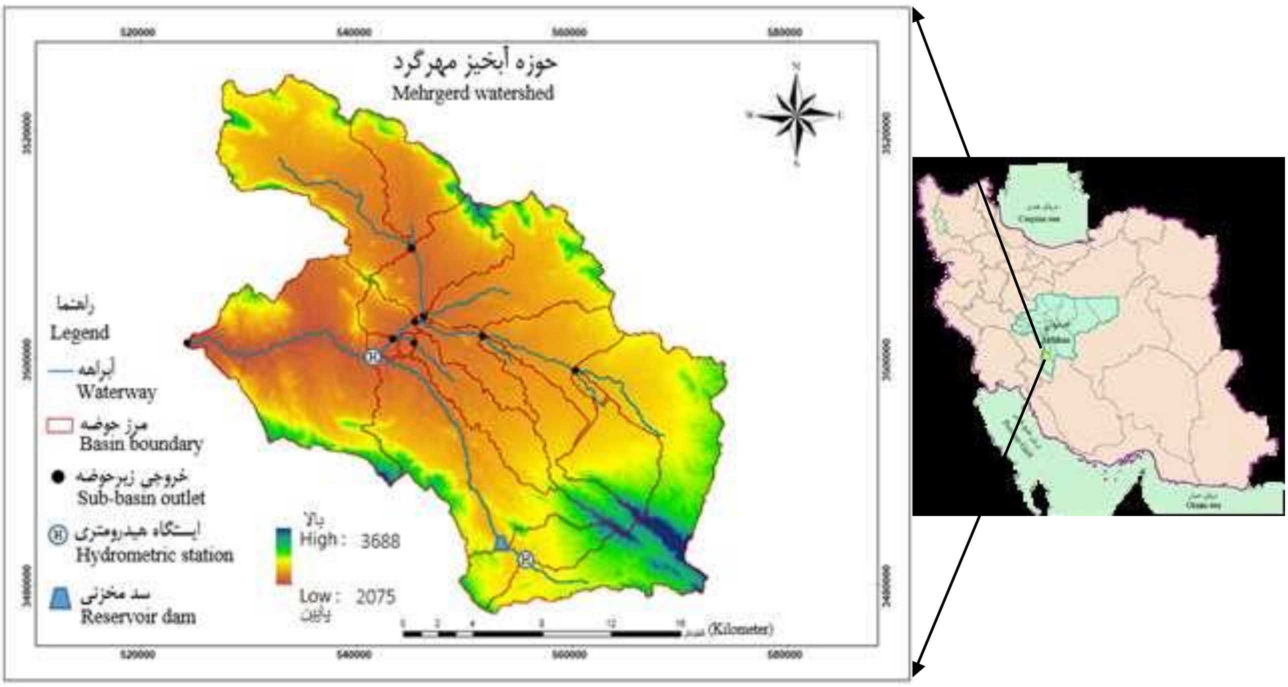
1- Soil and Water Assessment Tool

2- National Centers for Environmental Prediction

۳۱ درجه و ۵۰ دقیقه و ۵۷ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱۹ ثانیه شمالی به‌عنوان بخشی از حوضه آبریز کارون بزرگ با وسعت ۱۲۷۵/۵۹ کیلومتر مربع، در شمالی‌ترین بخش شهرستان سمیرم استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). کم‌ترین ارتفاع محدوده ۲۰۷۵ متر مربوط به بخش‌های خروجی حوزه آبخیز و بیش‌ترین ارتفاع محدوده ۳۶۸۸ متر از سطح دریا مربوط به قسمت‌های شمالی می‌باشد. اقلیم حوزه آبخیز براساس اقلیم نمای آمبرژه نیمه خشک سرد و بر اساس روش دومارتن نیمه خشک می‌باشد. بارندگی متوسط دشت در این محدوده ۳۳۹ میلی‌متر است. هم‌چنین متوسط بارندگی در ارتفاعات ۳۶۸ میلی‌متر در سال براورد شده است (۲۴).

شبیه‌سازی شرایط اقلیمی آینده با استفاده از مدل CanESM2

برای شبیه‌سازی شرایط اقلیمی آینده حوزه آبخیز مهرگرد از مدل CanESM2 استفاده شد. این مدل از جمله مدل‌های گردش عمومی جو سری CMIP5 می‌باشد و چهارمین نسل از مدل‌های آب و هوایی است که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب و هوای کانادا زیر نظر سازمان محیط زیست این کشور توسعه یافته است. در این مدل کل سطح زمین به‌صورت ۱۲۸×۶۴ سلول، شبکه‌بندی شده است (۶). هم‌چنین در پژوهش حاضر برای ریزمقیاس‌نمایی از مدل SDSM استفاده شد. این مدل یکی از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی تابع انتقالی آماری به شمار می‌آید (۳۶). با توجه به‌اینکه در چند سال اخیر به‌واسطه تغییر شرایط آب و هوایی، وضعیت هیدرولوژیکی حوزه آبخیز مهرگرد دستخوش تغییراتی شده است مدل‌سازی میزان و نحوه تغییرات متغیرهای اقلیمی حوضه برای دوره آتی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین با توجه به هدف پژوهش، بازه زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۷ به عنوان آینده نزدیک مبنای بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب و تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل حوضه قرار گرفت. همچنین به‌منظور بررسی اثر این تغییرات بر پارامترهای هیدرولوژیکی از داده‌های روزانه حداقل و حداکثر دما ایستگاه بروجن و بارش ایستگاه تنگ زردآلو برای دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۴ به‌عنوان ورودی‌های مدل اقلیمی استفاده شد. بر این اساس با استفاده از مدل SDSM5.2 ، خروجی مدل گردش عمومی CanESM2 به‌وسیله داده‌های مشاهداتی ریزمقیاس‌نمایی و با در نظر گرفتن سناریوی RCP8.5 برای آینده شبیه‌سازی شد. سپس ۲۶ متغیر اقلیمی بزرگ مقیاس از پایگاه داده NCEP در قالب یک فایل فشرده شده از طریق لینک https://scenarios.climatiques.canada.ca/?page=pred-canesm دانلود و به عنوان داده‌های ورودی به مدل اقلیمی معرفی شد. پس از انجام تکرار فرایند آنالیز از بین ۲۶ متغیر بزرگ مقیاس جو (پیش‌بینی‌کننده‌ها)، متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با بارش و دمای حوزه آبخیز (پیش‌بینی شونده‌ها) داشتند انتخاب شدند. برای اطمینان از صحت نتایج به‌دست آمده عملیات واسنجی و اعتبارسنجی انجام شد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز مهرگرد در استان اصفهان و ایران

Figure 1- Location of the Mehrgerd watershed in Isfahan province and Iran

همچنین برای ارزیابی کارایی مدل از یک سری معیارهای آماری مانند NS [۱]، R^2 [۲] و RMSE [۳] استفاده شد که در روابط ۱ تا ۳ به ترتیب ارائه شده است (۲۶).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{P}_i)^2} \qquad (۱)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}}\right]^2 \qquad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{n}} \qquad (۳)$$

در روابط ۱ تا ۳ O_i مقادیر مشاهده شده، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد سال‌های آماری می‌باشد.

شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی با استفاده از مدل SWAT

مدل SWAT به لحاظ مقیاس فضایی نیمه توزیعی و از نظر زمانی مدلی پیوسته است. در مدل SWAT ابتدا از روی مدل رقومی ارتفاعی (DEM [۴])، حوزه آبخیز اصلی به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود، سپس بر مبنای نقشه‌های خاک و کاربری اراضی و شیب، زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچکتری تقسیم می‌شوند، که به هرکدام از این واحدها یک واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU [۵]) می‌گویند. این واحدها باید تا حد امکان از نظر هیدرولوژیکی مشابه باشند. در واقع باید در هر واحد هیدرولوژیکی ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش و کاربری اراضی تغییرات چشمگیری نداشته باشند. خروجی‌های مدل در هر زیر حوضه محاسبه شده برای هر واحد هیدرولوژیکی، به روش وزنی به‌دست می‌آیند (۲۸). پس از معرفی نقشه DEM با دقت ۲۰ متر که از اداره آب منطقه‌ای استان اصفهان تهیه شده بود، منطقه به ۱۸ زیرحوضه تقسیم شد. در ادامه شبکه آبراهه ترسیم و موقعیت دو ایستگاه هیدرومتری تنگ زردآلو واقع در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز و پل بردکان در پایین دست سد و همچنین موقعیت سد مخزنی قره آقاچ به مدل معرفی و مرز حوزه آبخیز تعریف شد. در مراحل بعدی، نقشه کاربری اراضی با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی غیرپارامتریک ماشین بردار پشتیبان (SVM [۶])، در محیط نرم افزار ENVI5.3 تهیه شد. بر این اساس هفت نوع کاربری اراضی برای حوزه آبخیز مهرگرد در نظر گرفته شد که شامل: کشت آبی (AGRL)، کشت دیم (WWHT)، باغ (ORCD)، سطوح آبی (WATR)، مرتع (RNGE)، اراضی سنگلاخی (ROCK)، اراضی شهری (URBN) و خاک با دو طبقه به کمک کدهایی به مدل معرفی شد. به دلیل عدم وجود نقشه خاک حوضه مورد نظر از نقشه خاک جهانی موجود در سایت مدل SWAT به نشانی https://swat.tamu.edu استفاده شد. همچنین نقشه شیب حوضه بر اساس روش SCS به چهار طبقه تقسیم شد. در نهایت از تلفیق این سه لایه، نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) به دست آمدند. همچنین حد آستانه برای کاربری اراضی ۱۰ درصد، خاک ۱۰ درصد و شیب ۵ درصد در نظر گرفته شد. بر این اساس ۵۴ واحد پاسخ هیدرولوژیکی برای کل حوضه به‌دست آمد. با استفاده از این حدود آستانه برای خاک و کاربری اراضی، مناطقی که خاک و کاربری اراضی در آن‌ها کمتر از حد آستانه تعریف شده است توسط یک روش میانگین گیری وزنی به خاک و کاربری اراضی که بیشترین مساحت را در آن حوضه دارند تبدیل می‌شوند. بعد از آن‌که از صحت داده‌های ورودی به مدل اطمینان حاصل شد نوبت معرفی اطلاعات اقلیمی به مدل است. در همین راستا با مراجعه به سازمان هواشناسی کل کشور، اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده مدل SWAT برای بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ بر مبنای سال تأسیس و موجود بودن داده‌ها تهیه شد (جدول ۱). بر این اساس بارش روزانه، حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی ایستگاه‌های موجود در منطقه برای بازه زمانی مذکور در قالب فرمت TXT. وارد مدل شد. همچنین اطلاعات دو ایستگاه سینوپتیک شهرضا و بروجن به فایل wgen. user موجود در پایگاه داده مدل معرفی شد. هدف از انجام این مرحله استفاده از مولد داده اقلیمی (WGEN [۷]) برای بازسازی داده‌های مفقود می‌باشد.

1- Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient
2- Coefficient of Determination
3- Root Mean Square Error
4- Digital Elevation Model
5- Hydrologic Response Unit
6- Support Vector Machine
7- Weather Generator

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در مدل SWAT
Table 1- The characteristics of the stations used in the SWAT model

ردیف Row	نام ایستگاه Station name	نوع ایستگاه Station type	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع ایستگاه (متر) Station height (meter)	نام سازمان Organization name
1	سمیرم Semirom	سینوپتیک Synoptic	51º–34´	31º–25´	2470	هواشناسی Meteorology
2	شهرضا Shahreza	سینوپتیک Synoptic	51º–50´	31º–59´	1845	هواشناسی Meteorology
3	بروجن Borujen	سینوپتیک Synoptic	51º–18´	31º–57´	2197	هواشناسی Meteorology
4	لردگان Lordegan	سینوپتیک Synoptic	50º–49´	31º–31´	1580	هواشناسی Meteorology
5	اسفرجان Esfarjan	بارانسنجی Rain gauge	51º–55´	31º–40´	2270	هواشناسی Meteorology
6	تنگ سحری Tange sahari	بارانسنجی Rain guage	51º–40´	31º–03´	2130	وزارت نیرو Ministry of Power
7	مهرگرد Mehrgerd	تبخیرسنجی Evaporation gauge	51º–31´	31º–34´	2230	وزارت نیرو Ministry of Power
8	حنا Hana	تبخیرسنجی Evaporation gauge	51º–44´	31º–12´	2310	وزارت نیرو Ministry of Power
9	شهید حمزوی Shahid hamzavi	کلیماتولوژی Climatology	51º–49´	31º–09´	2274	هواشناسی Meteorology
10	تنگ زردآلو Tange zardaloo	هیدرومتری Hydrometry	51º–28´	31º–39´	2270	وزارت نیرو Ministry of Power

به‌منظور براورد تبخیر و تعرق از روش هارگریوز-سامانی استفاده شد. هم‌چنین دبی ماهانه خروجی از دو خط لوله انتقال آب در حوضه و سد مخزنی قره آقاچ پس از انجام محاسبات اولیه به همراه خصوصیات فیزیکی سد به مدل معرفی شد. در نهایت مدل SWAT برای اجرا آماده شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

منظور از واسنجی مدل، بهینه‌سازی پارامترهای تأثیرگذار مدل است به‌طوری که خروجی‌های شبیه‌سازی شده بتواند روند و تغییرات داده‌های مشاهداتی را در بازه مورد نظر توجیه کند. اعتبارسنجی بررسی صحت مدل واسنجی شده در بازه زمانی دیگر می‌باشد به‌طوری که در آن متغیرهای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بدون تصحیح هیچ پارامتری مقایسه شوند. برنامه‌هایی به این منظور توسعه پیدا کرده‌اند که می‌تواند به‌طور اتوماتیک این عمل را در حوزه‌های آبخیز بسیار بزرگ انجام دهند. الگوریتم SUFI-2 در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP یکی از این برنامه‌ها می‌باشد که در منابع بسیاری از آن استفاده شده است. واسنجی و تعیین میزان عدم قطعیت، توسط معیارهایی به نام P-Factor و R-Factor بررسی می‌شود (۱). در این پژوهش با توجه به اینکه دو سال برای آموزش مدل در نظرگرفته شد بنابراین برای واسنجی مدل از بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ و برای اعتبارسنجی از بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ مربوط به ایستگاه هیدرومتری تنگ زردآلو واقع در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز استفاده شد. در ابتدای اجرای مدل به منظور مشخص کردن پارامترهای مؤثر بر رواناب منطقه، آنالیز حساسیت با استفاده از روش هر بار یک پارامتر (OAT) برای مدل انجام شد و پارامترهای حساس برای واسنجی مدل تعیین شد. در این پژوهش تعداد داده‌های مشاهداتی در خروجی به‌صورت ماهانه برای رواناب در مرحله واسنجی ۱۰۸ و در مرحله اعتبارسنجی ۴۸ نمونه مورد استفاده قرارگرفت. برای واسنجی مدل ابتدا ۱۹ پارامتر که بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی دبی حوزه آبخیز مهرگرد داشتند انتخاب و بعد از انجام تحلیل حساسیت، ۱۰ پارامتر به عنوان تأثیرگذارترین پارامترها به مدل معرفی شدند. برای این کار از الگوریتم SUFI-2 استفاده شد.

الگوریتم SUFI-2 یک روش بهینه‌سازی معکوس است که درآن تمام منابع عدم قطعیت در دامنه معرفی شده برای هر پارامتر لحاظ می‌گردد. به‌نحوی که محدوده اولیه پارامترها بعد از هر بار تکرار به‌وسیله محدوده جدید به‌دست آمده توسط مدل، جایگزین شده و یک دامنه عدم قطعیت محدودتری از پارامترها به‌دست می‌آید. این روند تا زمانی که دو شاخص کمی‌سازی عدم قطعیت به حد مطلوب خود برسند یعنی P-Factor به یک و R-Factor به صفر میل کند ادامه پیدا می‌کند (۳۴). ولی اکثرا به دلیل خطاهای گوناگون در داده‌ها و عدم قطعیت مدل‌های مفهومی، هیچگاه این مقادیر برای دو پارامتر ذکر شده به‌دست نمی‌آید. بدین منظور مدل مجددا اجرا شد تا بازه

مناسب برای هر پارامتر به‌دست آمد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، از ضریب R^2، NS، P-Factor و R-Factor استفاده شد.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی اقلیم آینده با استفاده از مدل SDSM

با انجام سعی و خطا، بهترین متغیرها برای کوچک مقیاس کردن متغیرهای دما و بارش حوزه آبخیز مهرگرد انتخاب و به مدل معرفی شد (جدول ۲). پس از بازتولید و آنالیز داده‌های تولید شده توسط مدل SDSM، برای ارزیابی توانایی مدل از معیارهای آماری مانند R^2، RMSE و NS استفاده شد (جدول ۳).

جدول ۲- پیش بینی کننده‌های منتخب جهت ریزمقیاس‌نمایی بارش و دما

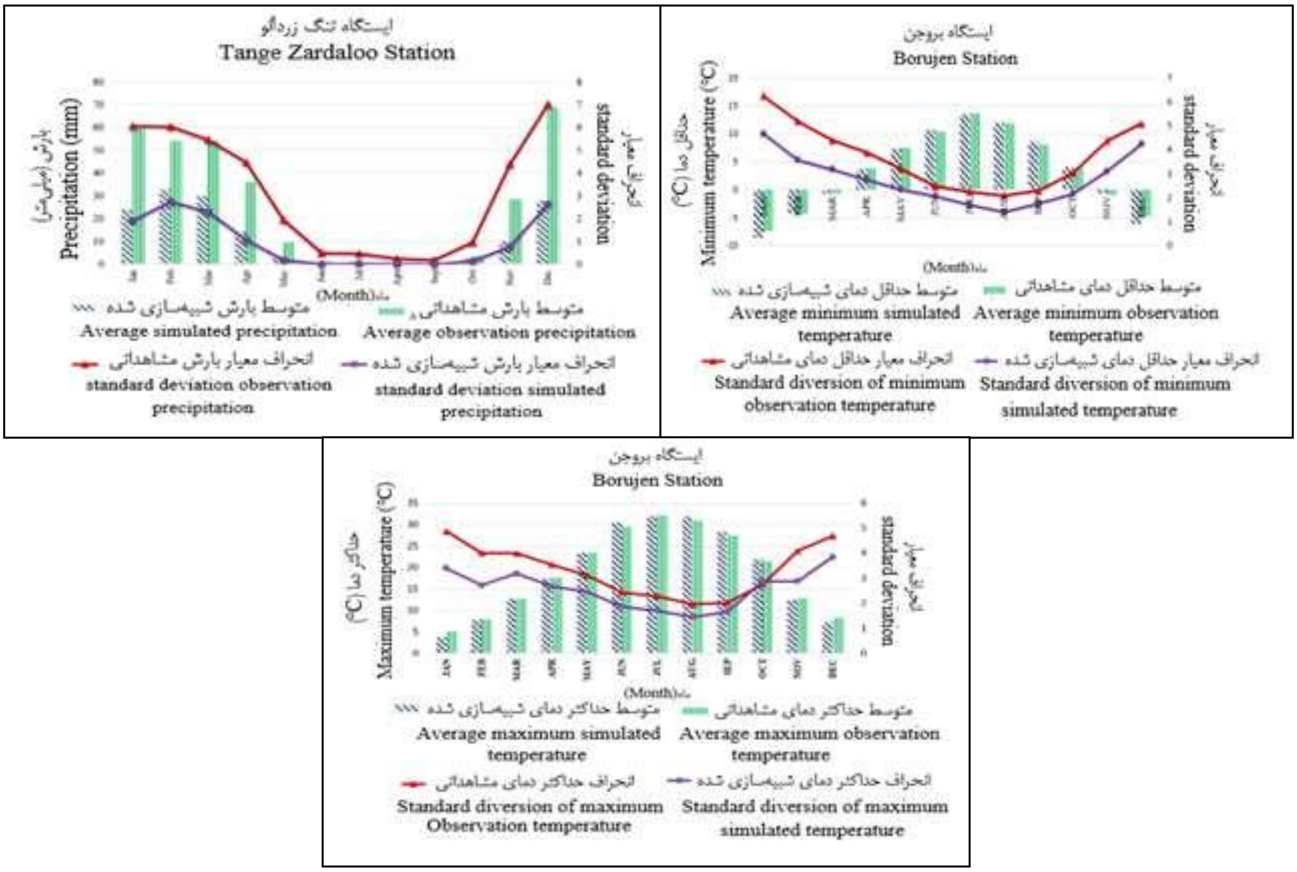
Table 2- Selection predictors for downscaling of precipitation and temperature

متغیر Variable	متغیر پیش‌بینی کننده Predictive variable	کوته نوشت Wrote short	مفهوم پیش بینی کننده Predictive concept	آماره p Statistics p	همبستگی جزئی Partial correlation
بارش Precipitation	ncepmslpgl.dat	Mslp	فشار متوسط سطح دریا Average pressure at sea level	0.01	0.1
	ncepp1_vgl.dat	p-v	باد نصف النهاری Meridional wind	0.02	0.08
	ncepp8_ugl.dat	p8-u	باد مداری تراز 850 hpa Wind orbital alignment hpa850	0.01	0.1
	ncepp8zhgl.dat	p8zh	واگرایی تراز 850 hpa Alignment divergence hpa850	0.3	0.04
	nceps500gl.dat	p500	ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 500hpa Geopotential height alignment hpa500	0.2	0.09
حداقل دما Minimum temperature	ncepp5_ugl.dat	p5_u	باد مداری تراز 500 hpa Wind orbital alignment hpa500	0.03	0.4
	nceps500gl.dat	p500	ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 500hpa Geopotential height alignment hpa500	0.15	0.2
	ncepp5thgl.dat	P5th	جهت باد تراز 500 hpa Wind direction alignment hpa500	0.3	0.18
	ncepp5zhgl.dat	P5zh	واگرایی تراز 500 hpa Alignment divergence hpa500	0.006	0.5
	ncepp8_ugl.dat	p8-u	باد مداری تراز 850 hpa Wind orbital alignment hpa850	0.00	0.16
	nceptempgl.dat	temp	میانگین دمای تراز 2 متر Average temperature alignment 2 meter	0.21	0.2
حداکثر دما Maximum temperature	ncepmslpgl.dat	Mslp	فشار متوسط سطح دریا Average pressure at sea level	0.00	0.3
	ncepp5_ugl.dat	p5_u	باد مداری تراز 500hpa Wind orbital alignment hpa500	0.02	0.04
	nceps500gl.dat	p500	ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز 500 hpa	0.13	0.2
	ncepp8_vgl.dat	p8-v	باد نصف النهاری تراز850hpa Meridional wind alignment850hpa	0.5	0.4
	ncepshumgl.dat	shum	رطوبت نسبی Relative humidity	0.04	0.03
	nceptempgl.dat	temp	میانگین دمای تراز ۲ متر Average temperatures alignment 2 meter	0.5	0.1

جدول ۳- معیارهای عملکرد مدل CanESM2 در مقایسه با مقادیر مشاهداتی

Table 3- Performance criteria for the CanESM2 model compared to observation values

شاخص‌های آماری Statistical indicators	بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	حداقل دما (درجه سانتی‌گراد) Minimum temperature (° C)	حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد) Maximum temperature (° C)
ضریب تعیین R^2	0.92	0.99	0.99
مجذور میانگین مربعات خطا RMSE	5.81	0.16	0.21
ضریب نش-ساتکلیف NS	0.39	0.99	0.99



شکل ۲- مقایسه میانگین و انحراف معیار بارش، حداقل و حداکثر دما مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی

Figure 2- Comparison of mean and standard deviation of precipitation, minimum and maximum temperature of observation and simulation values

با توجه به نتایج موجود در جدول‌های ۲ و ۳ مشخص شد که داده‌های درجه حرارت همبستگی بهتری با داده‌های مشاهداتی در مقایسه با داده‌های بارندگی داشته‌اند. به عبارتی تغییرپذیری دما نسبت به بارندگی کمتر است و دما یک متغیر پیوسته است که کمتر تحت تأثیر ناهنجاری‌های زمانی قرار می‌گیرد. درحالی‌که بارش تحت تأثیر عوامل مختلفی در حوضه قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، بارندگی یک متغیر گسسته است. نتایج بسیاری از مدل‌های گردش عمومی جو و مدل‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد که مدل‌سازی بارش معمولا همراه با خطا صورت می‌گیرد. همچنین مدل SDSM یک مدل رگرسیونی است. این مدل‌ها اکثرا با ایجاد روابط رگرسیونی بین متغیرهای بزرگ مقیاس و ریزمقیاس تعریف می‌شوند. برای شبیه‌سازی بارش، ریزمقیاس‌نمایی وقایع حداکثر در آینده توسط مدل‌های رگرسیونی تا حدی مشکل است (۳۵). لازم به ذکر است که حوزه آبخیز مهرگرد، کوهستانی است بنابراین بارش را به شدت تحت

تأثیر قرار می‌دهد و احتمال بروز خطا را در این متغیر افزایش می‌دهد. به بیان دیگر مدل SDSM نسبت به شبیه‌سازی بارش از حساسیت بالایی برخوردار بوده لذا هر عاملی که این متغیر را تحت تاثیر قرار دهد امکان بروز خطا توسط این مدل را تشدید می‌کند. به همین علت شاخص آماری نش–ساتکلیف در ارتباط با بارش نسبت به حداقل و حداکثر دما پایین‌تر برآورد شده است. که با توجه به ماهیت مدل و شرایط توپوگرافی حوزه آبخیز این حد از اختلاف قابل قبول است. در این راستا می‌توان به مطالعاتی چون عساکره و اکبرزاده (۵) در ایستگاه سینوپتیک تبریز، نادری و همکاران (۲۷) در حوضه سیمره اشاره کرد. بر این اساس شاخص‌های آماری به‌دست آمده برای حوزه آبخیز مهرگرد در سطح قابل قبولی قرار دارند. در شکل ۲ به خوبی واضح است که میزان بارش شبیه‌سازی شده برای آینده نسبت به میزان بارش مشاهداتی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. هم‌چنین بیشترین اختلاف در ارتباط با انحراف معیار بارش مربوط به ماه‌های ژانویه و دسامبر به ترتیب به میزان ۴/۱۴ و ۴/۳۷ واحد کمتر از مقدار انحراف معیار مقادیر مشاهداتی است. در ارتباط با دما، که در برخی از ماه‌ها، خصوصا در ماه‌های ژانویه و دسامبر درمورد دمای حداقل و در ماه‌های ژانویه و نوامبر در مورد دمای حداکثر، اختلاف نسبتا کمی بین انحراف معیار مقادیر مدل‌سازی شده و مشاهداتی وجود دارد با این وجود مدل‌سازی دماهای حداقل و حداکثر به میزان بسیار خوبی با داده‌های مشاهداتی مطابقت دارد. نتایج ریزمقیاس‌نمایی مدل گردش عمومی جو در این حوزه آبخیز نشان‌دهنده کاهش ۵۳/۴۸ درصدی بارندگی و افزایش حداقل و حداکثر دما به ترتیب به میزان ۰/۸۴ و ۳/۹۹ درجه سانتی‌گراد در دوره شبیه‌سازی شده ۲۰۳۰ –۲۰۱۷ نسبت به گذشته است.

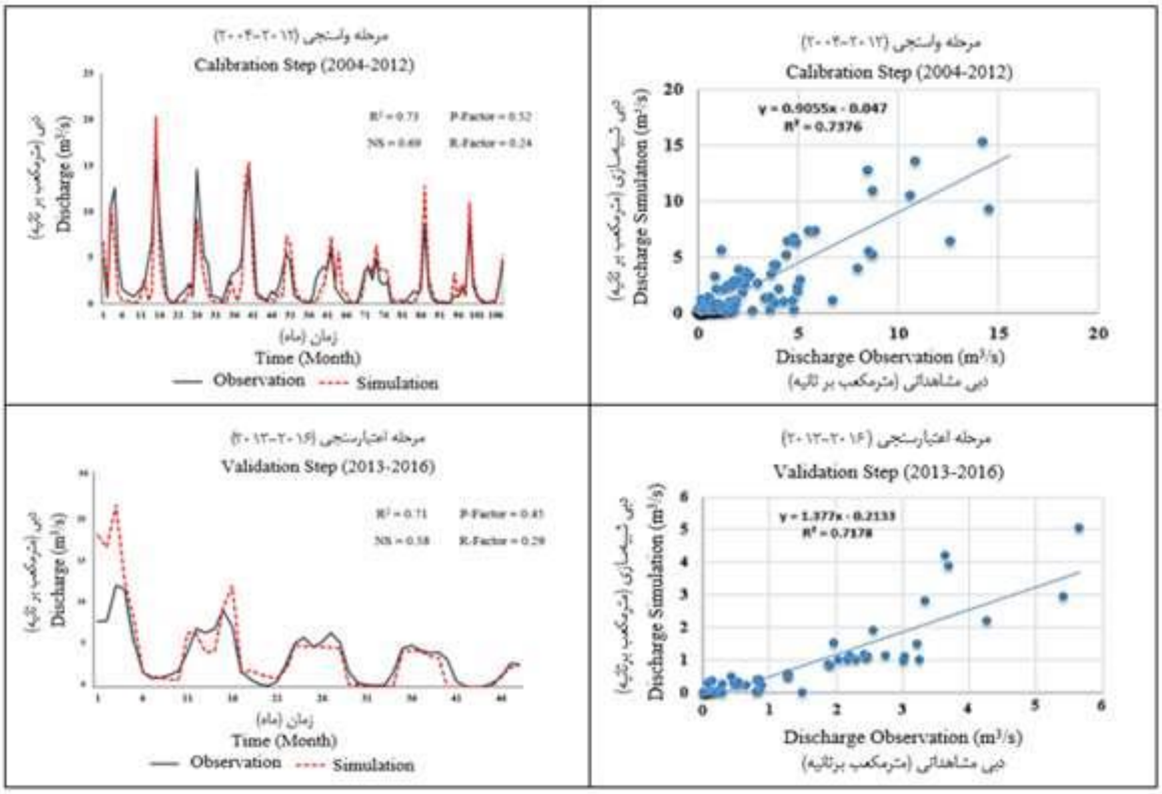
شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژی منطقه با استفاده از مدل SWAT

با توجه به این‌که ایستگاه هیدرومتری تنگ زردآلو به لحاظ کیفیت و طول دوره آماری در حد مطلوبی قرار دارد بنابراین از داده‌های این ایستگاه برای واسنجی و اعتبارسنجی رواناب ماهانه استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل، ۱۰ پارامتر به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها شناسایی شدند. که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. هم‌چنین نمودار همبستگی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مربوط به دوره واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه تنگ زردآلو در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ٤- نتایج آنالیز حساسیت پارامترها برای دوره واسنجی (۲۰۱۲-۲۰۰٤)

Table 4- Results of sensitivity analysis of parameters for the calibration period (2004-2012)

ردیف Row	نام پارامتر Parameter name	توصیف مؤلفه Component description	t-stat	p-value	مقدار بهینه Optimum amount
1	V__CN2.mgt	شماره منحنی scs برای شرایط رطوبتی II Curve numbers scs for humidityII	1.80	0.07	53.74
2	V__REVAPMN.gw	ضریب Revap آب زیرزمینی Revap coefficient of groundwater	-2.13	0.03	41.73
3	V__HRU_SLP.hru	متوسط تندی شیب Average slope steepness	2.76	0.01	0.60
4	r__SOL_AWC(1).sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (۱)(mm/mm) Available water capacity of the soil (1) (mm/mm)	-3.49	0	-0.04
5	r__SOL_AWC(2).sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (۲) (mm/mm) Available water capacity of the soil (2) (mm/mm)	-9.74	0	-0.40
6	V__GWQMN.gw	حد آستانه آب در آبخوان کم عمق Threshold shallow water aquifer	-4.10	0	257.88
7	V__ESCO.hru	فاکتور جبران تبخیر از خاک Factor to compensate for evaporation from soil	6.73	0	0.81
8	r__SOL_BD(1).sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی(۱) Soil bulk density in the surface layer (1)	8.92	0	0.39
9	r__SOL_BD(2).sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی (۲) Soil bulk density in the surface layer (1)	13.77	0	0.56
10	V__PLAPS.sub	نرخ تغییرات بارش با ارتفاع در هر زیرحوضه Changes in precipitation rates in each sub-height	70.59	0	297



شکل ۳- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب ماهانه ایستگاه تنگ زردآلو با استفاده از الگوریتم SUFI-2

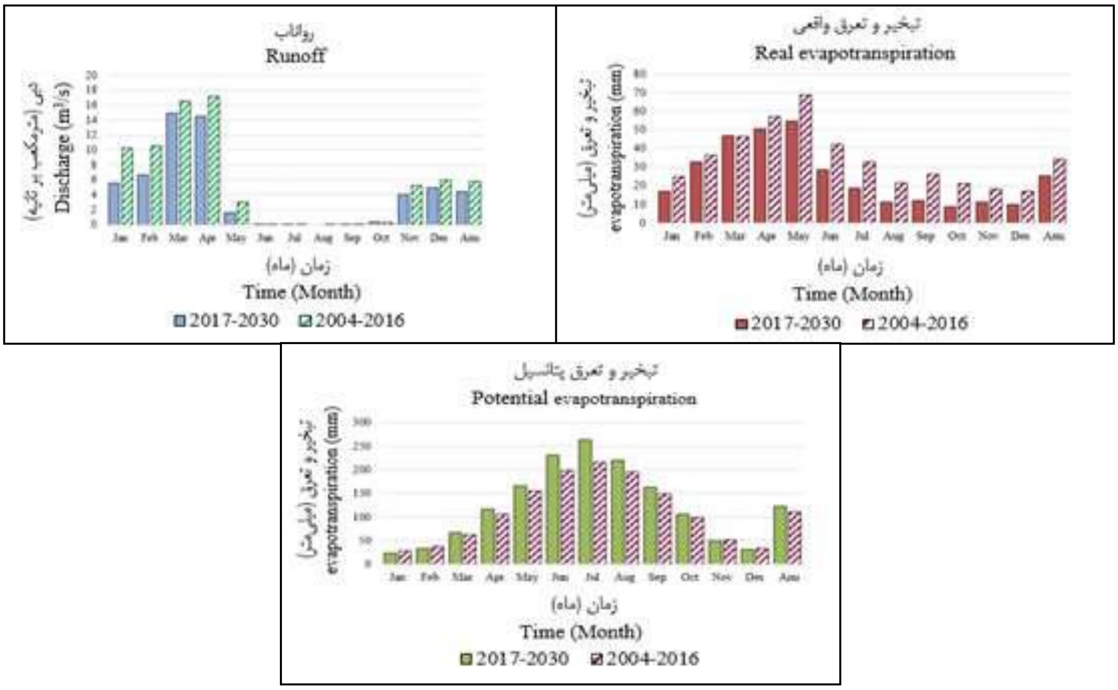
Figure 3- Calibration and validation results of the monthly runoff in Tange Zardaloo station using the SUFI-2 algorithm

با توجه به نتایج موجود در شکل ۳ شاخص P-Factor، R-Factor، R^2 و NS برای دوره واسنجی ۰/۵۲، ۰/۲۴، ۰/۷۳ و ۰/۶۹ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۴۵، ۰/۲۹، ۰/۷۱ و ۰/۵۸ به‌دست آمد. بنابراین درصد قابل قبولی از داده‌های مشاهداتی در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرارگرفتند. هم‌چنین نتایج نشان‌دهنده این است که مدل به‌صورت رضایت بخشی رواناب ماهانه حوزه آبخیز مهرگرد را شبیه‌سازی کرده است. با مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به خوبی واضح است که در بعضی از ماه‌های سال (می ۲۰۰۴ و مارس ۲۰۰۶) برای دوره واسنجی و (می ۲۰۱۳، مارس۲۰۱۴، آوریل ۲۰۱۵ و مارس۲۰۱۶) برای دوره اعتبارسنجی در نقاط پیک، تا حدودی همبستگی کمتری دارند. در این ارتباط می‌توان به مطالعات تولسون و شوماکر (۳۳) و چو و شیرمحمدی (۷) اشاره کرد. دلایل این مسئله عبارت است از: کوهستانی بودن و وجود سنگ آهک، آهک مارنی و آهک دولومیتی مربوط به کرتاسه زیرین که از ضخامت قابل توجهی برخوردار بوده و بخش عمده نواحی مرتفع را تشکیل می‌دهند. بخش‌هایی از جریان که مدل با اختلاف کمی نسبت به هیدروگراف مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است، در اواخر زمستان و اوایل بهار به‌خصوص در ماه‌های (مارس، آوریل و می) اتفاق افتاده است. از عواملی که سبب افت هیدروگراف مربوط به دبی شبیه‌سازی شده است، برداشت آب با هدف تأمین آب شرب مناطق مجاور همچون شهرضا و سمیرم با استفاده از خطوط انتقال آب و احداث سد مخزنی قره‌آقاج جهت تأمین مصارف مختلف ساکنین حوزه آبخیز می‌باشد.

بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب و تبخیر و تعرق

با توجه به شکل ۴ نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی اقلیم برای بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۳۰ توسط مدل SDSM حاکی از کاهش بارندگی و افزایش دما در تمام ماه‌های سال در مقایسه با دوره پایه می‌باشد. بر این اساس شبیه‌سازی رواناب حوزه آبخیز در دوره آتی و مقایسه مقادیر آن با دوره پایه بیانگر کاهش متوسط رواناب سالانه درازمدت در دوره آتی به میزان ۲۳/۸۲ درصد می‌باشد. هم‌چنین پیک رواناب از ماه آوریل به ماه مارس منتقل شده است. در شرایط اقلیمی گذشته که رژیم غالب بارش‌های زمستانه به‌صورت برف بوده است به دلیل شرایط دمایی گذشته بیشترین میزان رواناب در اوایل فصل بهار همزمان با ذوب برف زمستانه و بارش‌های بهاری اتفاق افتاده است. درحالی‌که در آینده نزدیک هرچند بارش‌ها از نظر کمی نسبت به گذشته کاهش می‌یابد ولی به دلیل تغییر رژیم بارش‌ها، نقطه اوج رواناب از اوایل بهار به سمت اواخر زمستان منتقل می‌شود. این نتایج

با مطالعات منصوری و همکاران (۲۱) در حوضه زرینه رود، اکبری و همکاران (۴) در حوضه رودخانه ارس و امیل سورو و همکاران (۹) در حوضه Bandama مطابقت دارد. با توجه به اینکه تغییرات دمایی عامل اصلی تغییرات اقلیمی شناخته شده است، معادله‌هایی که بر پایه پارامترهای دمایی باشند، با توجه به پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی قادر به پیش‌بینی میزان تبخیر و تعرق در دوره‌های آتی خواهد بود لذا از روش هارگریوز–سامانی که روش دمایی است به دلیل نیازمند بودن به داده‌های ورودی کمتر و پاسخگو بودن به مسئله پدیده گرمایش جهانی و محدود بودن داده‌های ریزمقیاس شده در حوضه برای بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر تبخیر و تعرق استفاده شد (۱۱). بر این اساس نتایج نشان‌دهنده کاهش تبخیر و تعرق واقعی آینده ۲۰۱۷ تا ۲۰۳۰ در مقایسه با دوره پایه ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ است. به‌طورکلی نتایج نشان‌دهنده کاهش متوسط سالیانه تبخیر و تعرق واقعی آینده در مقایسه با دوره پایه به میزان ۲۶/۰۳ درصد می‌باشد. این مسئله ناشی از کاهش بارش در آینده و عدم وجود آب کافی به جهت انجام مکانیسم تبخیر و تعرق واقعی می‌باشد. بنابراین با توجه به بحث افزایش دما و کاهش بارندگی برای دوره آینده و به دنبال آن کاهش رواناب سطحی و زیرسطحی این مسئله خود کاهش رطوبت خاک و در نتیجه کاهش مکانیسم تبخیر و تعرق واقعی را موجب خواهد شد. با توجه به شرایط اقلیمی حوزه آبخیز مهرگرد، بیشتر بارش‌ها در فصل زمستان به‌خصوص دی و بهمن ماه اتفاق می‌افتد و در فصل تابستان از میزان بارش‌ها به شدت کاسته خواهد شد به نحوی که کمترین میزان بارش مربوط به ماه‌های تیر و مرداد است. این حوزه آبخیز بر اساس تقسیم‌بندی کوپن جزء مناطق معتدل سرد با تابستان‌های گرم و خشک و در ارتفاعات جنوبی جزء مناطق معتدل سرد با تابستان‌های خنک و خشک می‌باشد. همچنین رشد پوشش گیاهی در این حوزه آبخیز از اواخر اسفند ماه شروع و در اواسط اردیبهشت به حداکثر رشد رویشی خود می‌رسد (۳، ۱۸ و ۳۰). بر این اساس بیشترین میزان تبخیر و تعرق واقعی در این حوزه آبخیز مربوط به اواخر زمستان تا اواسط بهار به‌خصوص ماه‌های فروردین و اردیبهشت می‌باشد. علت این مسئله رسیدن پوشش گیاهی به حداکثر رشد و وجود آب کافی است. در ارتباط با بحث تبخیر و تعرق پتانسیل نیز باید گفت با توجه به ارتباط تنگاتنگی که میان تبخیر و تعرق پتانسیل و دما وجود دارد بنابراین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه نسبت به دوره پایه به میزان ۱۰/۲۰ درصد افزایش می‌یابد. بر این اساس میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در حوزه آبخیز مهرگرد در فصل تابستان با افزایش دما به حداکثر خود خواهد رسید. . نتایج به‌دست آمده با مطالعات سیفی و همکاران (۳۲) در ایستگاه کرمان، کوهی و ثنایی نژاد (۱۹) در حوضه رودخانه ارومیه، گودرزی و همکاران (۱۲) در حوضه کرخه و لیانگ و همکاران (۲۰) در حوضه رودخانه Taoer در این باره هم‌سو بود.



شکل ٤- تغییرات رواناب ، تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل تحت تأثیر تغییر اقلیم (۲۰۱٦-۲۰۰٤؛۲۰۳۰-۲۰۱۷)

Figure 4- Runoff variations, actual evapotranspiration and potential affected by climate change (2004-2016, 2017-2030)

نتیجه‌گیری

با توجه به آن‌که آب و مسائل مربوط به آن از جمله دغدغه‌های اصلی بشر در دوره‌های آتی به حساب می‌آید جهت مدیریت هرچه بهتر، ضرورت دارد وقوع تغییرات اقلیمی و میزان تأثیرگذاری آن بر منابع آب ارزیابی گردد. در این پژوهش سعی شد تا با استفاده از مدل اقلیمی CanESM2 و مدل هیدرولوژیکی SWAT2012 اثر تغییر متغیرهای اقلیمی در آینده بر بیلان آب حوزه آبخیز مهرگرد به‌خصوص رواناب و تبخیر و تعرق (واقعی و پتانسیل) مورد بررسی قرار گیرد.

براساس خروجی‌های مدل SDSM مشخص شد که بارش در مقایسه با دوره مشاهداتی به میزان ۵۳/۴۸ درصد کاهش و دمای حداقل و حداکثر با اختلاف کمی نسبت به دوره مشاهداتی به ترتیب به میزان ۰/۸۴ و ۳/۹۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از معیارهای آماری حاکی از آن است که مدل، متغیرهای اقلیمی حوضه را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. بر این اساس ضریب R^2، RMSE و NS برای بارش به ترتیب معادل ۰/۹۲، ۵/۸۱ و ۰/۳۹ و برای حداقل و حداکثر دما به ترتیب معادل ۰/۹۹، ۰/۱۶، ۰/۹۹ و ۰/۹۹، ۰/۲۱، ۰/۹۹ به‌دست آمد. اگرچه ضریب نش–ساتکلیف در ارتباط با متغیر بارش در مقایسه با حداقل و حداکثر دما، پایین براورد شده است اما با توجه به ماهیت مدل SDSM، حساسیت مدل نسبت به بارش، اثرگذاری عوامل مختلف بر بارش هم‌چون توپوگرافی می‌توان گفت که مقدار به‌دست آمده برای ضریب نش–ساتکلیف قابل قبول است. به بیان دیگر مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش از دقت کمتری برخوردار است. در بخش هیدرولوژیکی معیارهای آماری R^2، NS، P-Factor و R-Factor برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۳، ۰/۶۹، ۰/۵۲و ۰/۲۴ و برای دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۵۸، ۰/۴۵ و ۰/۲۹ به دست آمد. لازم به ذکر است که مدل SWAT بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه و به‌صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به ساز و کار مدل در ارتباط با شبیه‌سازی رواناب ماهانه ماه‌های پس از فصل سرما که در طی آن‌ها با گرم شدن هوا، برف باریده شده در فصل سرما، ذوب می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که مدل قادر به شبیه‌سازی خوب ذوب برف در برخی از ماه‌های سال نبوده است و جریان حداکثر شبیه‌سازی شده تطابق کمتری با مقادیر مشاهداتی دارد. در ادامه با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب و تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل حوضه، اقلیم شبیه سازی شده برای آینده به مدل SWAT معرفی شد. پس از تحلیل نتایج مشخص شد که متوسط رواناب سالانه به میزان ۲۳/۸۲ درصد روند رو به کاهشی داشته است. هم‌چنین تبخیر و تعرق واقعی به میزان ۲۶/۰۳ درصد کاهش و تبخیر و تعرق پتانسیل به میزان ۱۰/۲۰ درصد افزایش یافته است.

منابع

1- Abbaspour K.C. 2011. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs Version 2: A User Manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 100 pp.

2- Abraham T., Abate B., Woldemicheeal A., and Muluneh A. 2018. Impacts of Climate under CMIP5 RCP Scenario's on the Hydrology of Lake Ziway Cathment, Central Rift Valley of Ethiopia. Journal of Environment and Earth Science 8(7): 10.

3- Abtahi M. 2016. Investigation of vegetation dynamics of semi-stepi rangelands of Isfahan province (Case Study: Dolat Gharin Semirom). Iranian Journal of Natural Resources 69(2): 311-322. (In Persian)

4- Akbari F., Taheri Borujeni G., Moridi A., and Khazaee Pool A. 2018. The Effect of climate change on runoff in the Aras river basin using SWAT model 15-16 May 2018. The first national conference on water and soil assessment (SWAT) in water resources management in the country. Isfahan University of Technology,11pp. (In Persian)

5- Asakoreh H., and Akbarzadeh Y. 2017. Simulation of temperature and precipitation variations in the synoptic station of Tabriz during (2010-2100) using statistical Downscaling (SDSM) and output model (CanESM2). Journal of Geography and Environmental Hazards 21: 174-153. (In Persian)

6- Charron I.A. 2014. Guidebook on climate scenarios: Using climate information to guide adaptation research and decisions. 94pp.

7- Chu T.W., and Shirmohammadi A. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland 47(4): 1057−1073.

8- Dlamini N.S., Kamal R., Amin M., Mohd B., Syazwan M., and Fikri A. 2017. Modeling potential impacts of climate change on streamflow using projections of the 5th assessment report for the Bernam River Basin, Malaysia. Water, 9: 22pp.

9- Emile Soro G., Berthe Yao A., Morton Kouame Y., and Goula B. 2017. Climate Change and Its Impacts on Water Resources in the Bandama Basin, Côte D'ivoire. Journal Hydrology 4(18): 13.

10- Ghermezcheshmeh B., Hajimohammadi M., and Ahmadi M. 2017. Validation of SWAT model accuracy in minimal

flow simulation (case study: Can basin). 31 May- 1 Jun.2017. Second National Conference on Soil and Water Conservation. Iran,12pp. (In Persian)
11- Goodarzi M., Salahi B., and Hoseini S.A. 2015. Estimation of evapotranspiration in relation to climate change in the watershed of Lake Urmia. Eco Hydrology 2(2): 175-189. (In Persian)
12- Goodarzi M., Hoseini M., and Parekar M. 2017. The application of quasi-quantitative statistical method to estimate the change of Karkheh basin to the dam, Iran-Watershed Management Sience and Engineering 10(35): 51-64. (In Persian with English abstract)
13- Goodarzi M.R., Faraji A.R., and Komasi M. 2018. Uncertainty of downscaling methods in future catchment flow under climate change effect. Journal of Water and Soil 31(6):1586-1575. (In Persian with English abstract)
14- Hewitson B.C., and Crane R.G. 1996. Climate downscaling: techniques and application. Journal Climat Research. Published November 7(29): 85-95.
15- IPCC. 2001. Climate Change.The Scientific Based. Contribution of Working Group 1 To The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change, Houghton, J.T.Etc. (Eds), Cambridge University Press, Cambridge And New York; Chap.8:881 pp.
16- IPCC-TGCIA. 2007. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Ads. Mass. task group on data and scenarios support for impact and climate assessment.
17- IPCC. Climate Change. 2013.The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK.222pp.
18- Jabbari S., Khajadini J., Jafari R., Soltani S. 2014. Investigating the changes of vegetation cover percentages using satellite images in the Semirom area. Iranian Journal of Applied Ecology 3(10): 27-38. (In Persian)
19- Koohi V., and Sanai Nejad H. 2013 Assessment of climate change scenario based on microscopic methods for calculating evapotranspiration of Urmia region. Journal of Irrigation and Drainage Research 559-574. (In Persian)
20- Liang L., and LijuanL Qiang L. 2010. Emporal variation of reference evapotranspiration during 1961-2005 in the Taoer river basin of Northeast China. Agricultural and Forest Meteorology, 150: 298-306.
21- Mansuri B., Ahmadzadeh H., Masah Bavani A., Morid S., Delavar M., and Lotfi S. 2015. Investigating the effects of climate change on water resources of Zarrinehroud area using SWAT model Water and Soil Journal Agricultural Science and Technology 28(6): 1191-1230.
22- Melke A., and Abegaz F. 2017. Impact of climate change on hydrological responses of Gumara catchment, in the Lake Tana Basin Upper Blue Nile Basin of Ethiopia. International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 9(1): 8-21.
23- Merritt W.S., Alila Y., Barton M., Taylor B., Cohen S., and Neilsen D. 2006. Hydrologic response to scenarios of climate change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia. Journal of Hydrology 326: 79–108.
24- Ministry of Power. 2017. Report of water resources balance of study areas Great Karun Basin. Volume 5: Water Resources Assessment Report. Appendix 24: Water balance of the Mehrgerd Study Area (2324). Code: SR-105-39.
25- Molina-Navarro E., Hallack-Alegría M., Martinez-Pérez S., Ramirez-Hernández J., Mungaray-Moctezuma A., and Sastre-Merlín A. 2015. Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. Agric. Water Manage 175: 29-42.
26- Moriasi D., Wilson B., Douglas-Mankin K., Arnold J., and Gowda P. 2012. Hydrologic and water quality models: Use, calibration, and validation. Trans. ASABE 55(4): 1241-1247.
27- Naderi S., Goodarzi M., and Ghadami Dehno M. 2018. Effects of climate change on climate parameters in Seymare Basin. Iran-Watershed Management Science & Engineering 11(39): 69-76. (In Persian with English abstract)
28- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., and Williams J.R. 2005. Soil and water assessment tool documentation, (user's manual). 494 pp.
29- Neitsch S., and Arnold J., Kiniry J., and Williams J. 2011. Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2009, Texas Water Resource Institute, USA.647pp.
30- Saboohi R., Barani H., Khodagholi M., Abedi Sarvestani A., and Tahmasebi A. 2019. Nomads' indigenous knowledge and their adaptation to climate changes in Semirom city in Central Iran. Theoretical and Applied Climatology 137: 1377–1384.
31- Sathian K.K., and Shyamala P. 2009. Application of GIS integrated SWAT model for basin level water balance. Indian Journal of Soil Conservation 37: 100-105.
32- Seifi A., Mirlotfi SM., and Riahi H. 2011. Developing a combined model of linear regression and factor analysis (mlr-pca) for evaluating reference evapotranspiration (Case Study: Kerman Station). Journal of Water and Soil Science 1186-1196. (In Persian with English abstract)
33- Tolson B.A., and Shoemaker C.A. 2004. Watershed modeling of the canyonville basin using SWAT2000: model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the cannons ville reservoir. school of civil and environmental engineering. 159 pp.
34- Uniyal B., Jha M.K., and Verma A.K. 2015. Parameter identification and uncertainty analysis for simulating streamflow in a river basin of Eastern India, Hydrological Processes 29(17): 3744-3766.

35- Wilby R.L., Dowson C.W., and Barrow E.M. 2002. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, environmental modeling & software 17: 147-159.
36- Wilby R.L., and Dawson W.C. 2007. SDSM 4.2- A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, SDSM manual version 4.2, Environment Agency of England and Wales, 94 pp.
37- Zhang Y., You Q., Chen C., and Ge J. 2016. Impacts of climate change on stream flows under RCP scenarios: a case study in Xin River Basin, China. To appear in: Atmospheric Research, 46pp.
38- Zuo D., Xu Z., Zhao J., Abbaspour K., and Yang H. 2015. Response of runoff to climate change in the Wei River basin, China. Hydrological Sciences Journal 37-41.

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 1, March-April 2020, p. 225-239

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۹، ص. ۲۳۹-۲۲۵

Analysis of Effect of the Climate Parameters Change on Runoff and Evapotranspiration of Mehrgerd Watershed

Z. Nouri[1]- A. Talebi[2*]- B. Ebrahimi[3]

Received: 02-09-2019
Accepted: 12-01-2020

Introduction: In the past century, the climate has been changing on both regional and global scales over the earth. It is also expected that such changes will continue in the near future. Climate change is due to increased greenhouse gas emissions in the atmosphere. The concentration of these gases is directly related to the temperature increase. Climate change affects the hydrological cycle through changes in time, amount, the shape of precipitation, evaporation rates and transfer, soil moisture, runoff, etc. Today, the use of hydrological models have been developed to have the factors affecting the hydrological cycle in the watershed. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is an example of these models. The common method of assessing the effects of climate change on flow is using hydrological models along with general circulation models (GCMS) or regional weather models (RCMS). The purpose of this study is to investigate the effect of climate change on runoff and evapotranspiration (real and potential) of Mehrgerd Watershed using the SWAT hydrologic model and the CanESM2 climatic model.

Materials and Methods: For modeling the change rate of regional climate parameters in the future period (2017-2030) and the effect of these changes on hydrological parameters, the daily data of minimum and maximum temperature of the Borujen station and precipitation of the Tange Zardaloo station for the base period (1984-2005) were used as inputs of the CanESM2 model. Accordingly, using the model of SDSM5.2 under the scenario of RCP8.5 was performed the downscaling operation. To evaluate the efficiency of the SDSM model were used statistical criteria R^2, RMSE, and NS. In the next step, the SWAT 2012 model was used to simulate the hydrologic conditions. After introducing the DEM map with a precision of 20 meters, the region was divided into 18 sub-basins. From the combination of land use maps, soil, and slope, 54 units of hydrological response (HRU) were obtained. Then, climatic data including precipitation, minimum and maximum temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation were introduced to the model. Due to the presence of the dam and the two water transfer lines in the area, physical data and discharge were calculated and introduced into the model. The calibration and validation of the model were done by Sufi-2 algorithm. The calibration process was conducted for the period 2004 to 2012 while the validation process was from 2013 to 2016. In order to evaluate the performance of the model, coefficients NS, R^2, P-Factor and R-Factor were used. For this purpose, the model was restarted to obtain the appropriate range for each parameter. After calibrating the hydrological model was introduced the simulated climate to the SWAT model. Finally, the effect of climate change was investigated on runoff and evapotranspiration (real and potential) of Mehrgerd Watershed.

Results and Discussion: The results of the downscaling of the climatic model in this region indicate a decrease of 53.48% of precipitation and increase minimum and maximum temperatures for a future period (2017-2030), 0.84 and 3.99%, respectively. Based on the results of the sensitivity analysis of the SWAT model, 10 parameters were identified as the most sensitive parameters. In the hydrological section, the statistical criteria of R^2, NS, P-Factor and R-Factor were obtained for the calibration period 0.73, 0.69, 0.52 and 0.24, respectively and for the validation period, 0.71, 0.58, 0.45 and 0.29, respectively. Comparing runoff simulation in the future period under the influence of climate change and comparison of its values with the base period showed a decrease of 23.82% in an annual average of runoff. Climate change will also reduce actual evapotranspiration by 26.03% and increase potential evapotranspiration by 10.20%.

1 and 2- M.Sc. Graduated and Professor in Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Yazd University, respectively.
(*- Corresponding Author Email: talebisf@yazd.ac.ir)
3- Ph.D. in Geomorphology, Head of the Planning and Economic Analysis Office, Isfahan Regional Water Company
DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82329

Conclusion: Based on the results of the SDSM model, it was determined that the precipitation is strongly reduced in comparison with the observation period, and the minimum and maximum temperatures increase with a slight difference compared to the observation period. According to statistical criteria, the SDMS model has succeeded in simulating the parameters for the future period. Accordingly, the values of R^2, RMSE, and NS for precipitation, were equal to 0.92, 5.81 and 0.39, respectively, and for the minimum and maximum temperatures were obtained 0.99, 0.16, 0.99 and 0.99, 0.21, 0.99, respectively. In the hydrological section, the statistical criteria were acceptable values for the calibration period and the validation. Finally, it was found that under the influence of climate change, runoff decreases. Real evapotranspiration is also declining due to a lack of available water, but potential evapotranspiration is increasing due to the close relationship with temperature.

Keywords: Climate change, Climate scenarios, Downscaling, SWAT Model, Water balance